

流木集積によるダム洪水吐放流能力の影響評価

EVALUATION OF DISCHARGE OF SPILLWAY WITH ACCUMULATION OF DRIFTWOODS

佐藤 隆 宏¹

Takahiro SATO

¹ 正会員 工修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

When it rains heavily in mountains, many driftwoods flow in dam reservoirs. Then the driftwoods caught by the crest pier of the spillway might cause the water level raising. This study experimentally clarifies behavior of driftwoods in front of piers using different length and diameter of driftwoods under different flow conditions of quantity and gate opening. Also the maximum water level is investigated when the driftwood begins to be caught by the pier. The relationship between number of the driftwoods captured by the pier and the water level rise amount is examined. In addition, an experimental evaluation approach is presented to predict the maximum water level when many driftwoods are captured by the crest pier of the spillway.

Key Words: driftwood, dam, spillway, discharge, hydraulic model experiment

1. 緒言

近年、大規模な出水や森林環境の劣化によって流木が多量に河川・海域へ流出し、橋梁集積、橋体破壊、港湾閉塞等、様々な問題を引き起こしている。ダム貯水池においても、洪水吐を通過する流木によるダム監査橋の破壊、出水後の多量の流木堆積とその処理問題が生じている¹⁾。一般的なダム貯水池では、網場と呼ばれるフロートとネット等で構成された流木止めをダム貯水池に浮かべ、流木がダム放流設備に進入しないように対策している。しかし、大規模出水時には、速い流れによって網場の機能が失われ、流木がダム放流設備に進入し、洪水吐の橋脚(ピア)に衝突したり、そのまま流出する。

河道における流木の流下・堆積、橋梁橋脚における流木集積に関する研究は、従来より実験的検討を含めて数多くなされている^{2,3,4)}。また、渓流における流木の発生・流下や砂防堰堤等における堆積機構は現地調査や水理実験によって明らかにされている⁵⁾。一方、ダム放流能力に対する流木影響については、治水専用のいわゆる穴あきダムを対象とした研究⁶⁾が行われているが、一般的なダム洪水吐を対象とした研究は行われていない。クレストゲート付きダムのピア間隔は、橋梁の橋脚間隔よりも遥かに狭く、多量の流木がダム放流設備に同時に進入した場合、ダムの閉塞を引き起こし、放流能力が低下する可能性があるものの、これらについては定性的にも定量的にも明らかにされていない。

よって本研究では、水理模型実験によって、ダム貯水池における流木集積が洪水吐の閉塞をもたらす流動・流木条件を明らかにするとともに、流木によるダム洪

水吐閉塞現象とダム貯水池の水位上昇量の関係を調べる。そして流木集積時のダム洪水吐放流能力を推定できる評価手法について検討を行う。

2. 実験・計測装置および流木模型

本研究で用いた実験設備を図-1に示す。水路は幅1.77m、長さ10.00m、高さ1.40mの鋼製であり、上流2.60m区間に堰、水位調整用横越流堰、整流装置を設置し、なるべく乱れの少ない流れを均等に供給している。整流装置末端から3.40m下流にはゲート3門を有するダム堤体模型を設置している。ダム堤体模型は実物の1/15相当の大きさであり、スライドゲート(幅 $B=0.509\text{m}$)とピア(幅 0.120m)を有している。形状の詳細は既報告⁷⁾を参考にされたい。なお、本論文では、左右のゲート2門を全閉し、中央ゲート1門のみから越流させた実験ケースのみを報告する。

計測に関しては、貯水池水位をポイントゲージと容量式波高計、流速を3次元電磁流速計(センサー直径14mm)、流量をJIS規格の全幅堰(95%信頼度の不確かさ $\pm 1.7\%$ 以内)で測定する。なお、貯水池内水位を計測する波高計に流木が衝突しないよう、水路両側壁にアクリル製の壁を別途設け、その間に波高計を設置する。

流木模型に関しては、ヨーロッパビーチ製の丸棒を用い、表面をニス塗装している。密度 ρ_d は $788\pm 17\text{kg/m}^3$ である。大きさについては、従来の研究^{3,4,5,6)}を参考に、模型縮尺が1/15相当、ゲート間隔が0.509mであることを考慮して、長さ L は0.500m、0.700m、1.000m、直径 d は0.010m、0.018、0.020mの各々3ケースとする。

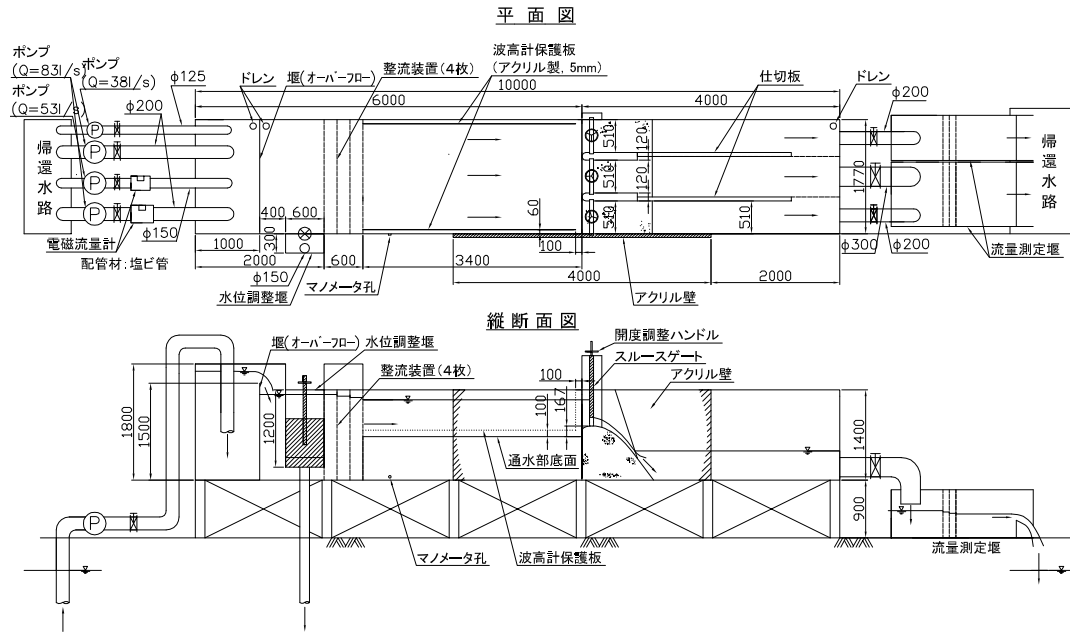


図-1 実験模型の平面図ならびに縦断面図

3. 流木の漂流 / 閉塞遷移水位

ゲートを有するダム洪水吐の場合、ゲート全開になる前に流木が進入することもある。その場合、ゲート開度が小さく貯水池水位が高ければ、流木は貯水池水面に漂流する。しかし、ゲート開操作を続けるに従ってダム洪水吐前面の流速は速くなり、漂流している流木は水面下に引き込まれやすくなる。水面下に没した流木はピアに捕捉され集積するか、そのままダム下流へ流出するか、漂流を続けることとなる。

本節では、ゲート全開ではないパーシャルフローを対象に、流木が漂流状態から閉塞状態に移る流動条件と流木条件の関係を検討する。すなわち、流量一定条件下でゲート開度 a と貯水池水位 h_1 を変えて定常状態を一旦つくり、そこに上流から流木をダム洪水吐と平行な状態で投入し、閉塞状態となり得るか、漂流状態のままかを調べる。また、この漂流 / 閉塞遷移水位に対する流量 Q と流木長さ L 、流木直径 d の影響を検討する。なお、流木が構造物に引っ掛かった状態を、従来の研究^{2, 3, 4, 5)}では堆積状態や集積状態と称しているが、本研究では1本の流木がピアに捕捉され、ダム洪水吐を閉塞させた状態を含めて閉塞状態と定義する。

表-1 に実験ケース名を、図-2 に実験ケース毎に得られた漂流状態と閉塞状態の遷移ゲート開度 a ならびにその貯水池水位 h_1 を示す。ここに、ゲート開度は5mm 間隔で操作したため、漂流 / 閉塞遷移水位は幅をもっている。また、貯水池水位 h_1 はクレスト天端標高基準である。なお、流量条件は既報告⁷⁾を参考に決定した。

これらによると、漂流 / 閉塞遷移水位は流量、流木長さ、流木直径に依存し、大局的には流量が多いほど、流木長さが短いほど、流木直径が細いほど漂流 / 閉塞遷移水位は高くなる。つまり、水位が同じ場合、閉塞され易くなる。しかし、流木長さがピア間隔より短い

0.50m のケースでは、流木長さ 0.70m と漂流 / 閉塞遷移水位の違いがあまり見られないなど、その傾向とは異なる結果もある。

次に、漂流 / 閉塞遷移水位のモデル化を行う。漂流状態にある流木が流れに引き込まれ、閉塞状態に移る流木では、流木自身の浮力と流れから作用される流体力が釣り合っていると考えられる。つまり、パラメータとして以下の無次元量が用いられると考えられる。

$$\frac{\rho_w C_D L' d \frac{V^2}{2}}{(\rho_w - \rho_d) g \frac{\pi}{4} d^2 L} \approx \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_d}} \sqrt{\frac{L'}{L}} \frac{V}{\sqrt{g d}}$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 ρ_d は流木の密度、 C_D は抗力係数、 L' は流木長さのうち流れが作用する長さ、 V は流木に作用する流速、 g は重力加速度である。

このうち、漂流 / 閉塞遷移水位において流木に作用する流速 V については、水面近傍の流速で与えられると考えられることから、ゲート開度 a と貯水池水位 h_1 を変化させ、水面近傍の流速を計測した。水位開度比 h_1/a と無次元流速 $\sqrt{U^2 + W^2} / \sqrt{g h_1}$ の関係を図-3 に示す。ここに、流速計センサーは、ピア先端上流 0.04m、ゲート中心、水面下 0.02m の位置に設置した。なお、流木はピア直上流ではなく、少し離れたピア先端上流 0.04m 付近から引き込まれることが多い。これらによると、水位開度比 h_1/a と無次元流速 $\sqrt{U^2 + W^2} / \sqrt{g h_1}$ の関係は流量にほとんど依存しないことが分かる。

流れが流木に作用する長さ L' については、流木長さ L がゲート幅 B よりも長い場合には、ゲート幅 B が与えられると考えられる。その理由は、中央1門から放流する場合、ピア先端より側壁外側の流速はゲート中心の流速よりも遅く、かつ、流木に対して流向も垂直ではない。よって、ピア先端よりも側壁外側の流れは流木閉塞に作用しないと考えられる。

表-1 漂流 / 閉塞遷移水位実験条件

	流量 Q	流木長 L	流木直径 d
Case1-1	45.9L/s	1.00m	0.02m
Case2-1	45.9L/s	0.70m	0.02m
Case3-1	45.9L/s	0.70m	0.01m
Case4-1	45.9L/s	0.50m	0.02m
Case5-1	80.3L/s	1.00m	0.02m
Case6-1	80.3L/s	0.70m	0.02m
Case7-1	80.3L/s	0.70m	0.01m
Case8-1	80.3L/s	0.50m	0.02m

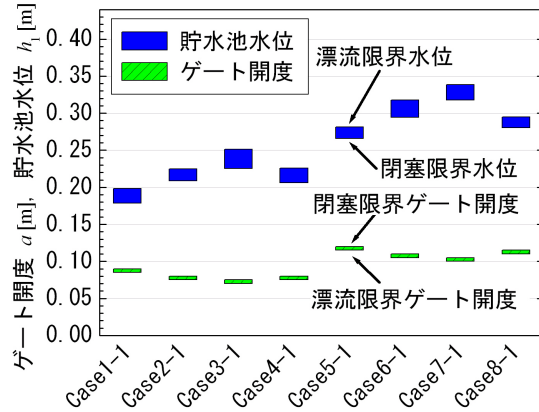


図-2 漂流 / 閉塞遷移水位とゲート開度

各ケース毎に流速 V や流木長さ L などを与え、算定した結果を図-4 に示す。これらより漂流 / 閉塞遷移パラメータは、流量 Q や流木長さ L 、流木直径 d に依らず、0.6~1.0 となることが分かる。つまり、漂流 / 閉塞遷移パラメータが 0.6 程度より大きい流動・流木条件であれば、閉塞状態になり得ることが分かる。よって以下の検討においては、安全側の評価となる 0.6 を漂流 / 閉塞遷移パラメータとして用いる。

4. 閉塞状態における水位上昇量

橋梁橋脚における集積現象に関する実験的研究によると、流木の投入方法、すなわち、一度に投入する流木の本数や揃え方(揃える、乱積み)、投入位置などによって集積率(=集積本数/総投入本数)や水位上昇量が異なることが知られている^{3,4)}。

そこで本研究においても、ダム洪水吐を対象に同様の実験を行う。すなわち、同じ流動条件(ゲート全開、流量 80.3L/s)と流木条件(流木長 1.00m、流木直径 0.02m)に対して、投入方法と投入場所を変えた 4 ケースにおいて各々 5 回ずつ試行し、閉塞状態となった流木本数(以下、閉塞本数)と水位上昇量 Δh_1 を調べる。それらの結果を図-5 に示す。ここに、水位上昇量 Δh_1 は初期水位との差である。また、投入方法の「置く」とは流木を水面にダムと平行に置いて投入すること、「落とす」とは流木を水面上からダムとほぼ平行になる状態で落として投入することである。投入場所の「中央」とはダム上流 3.3m の水路中央部に投入すること、「左中右」とはダム上流 3.3m の水路の左側、中央部、右側に順に投入

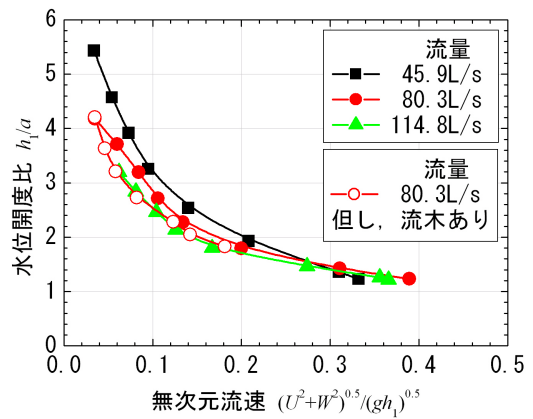


図-3 ゲート直上流水面近傍流速

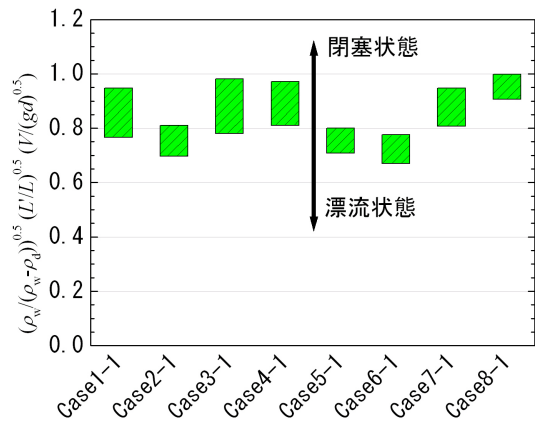


図-4 漂流 / 閉塞遷移パラメータ

することである。なお、投入間隔 10 秒、投入時間 5 分、総投入本数 31 本であり、この投入時間、総投入本数で閉塞本数は定常に達し、閉塞状態となった流木以外は洪水吐下流に流出するか、貯水池内を漂流する。

これらによると、閉塞本数が多いと水位上昇量が多い傾向は見られるものの、同じ条件であっても閉塞本数が異なったり、同じ条件で閉塞本数も同じであっても水位上昇量が異なることが分かる。この要因として、流木は上流から流下する過程で回転し、ゲート部に到達する際の姿勢が異なり、最初の 1 本目から閉塞状況に違いが生じ得ること。このため、2 本目以降は閉塞状況の履歴が閉塞本数と閉塞状態となった流木群の形状に影響を与え、結果的に水位上昇量にも違いが生じることが考えられる。このように、ダム貯水池上流から流入した流木による閉塞現象は、閉塞の履歴に依存し、定量的な評価が難しいことが分かった。しかし、図-5 によると、閉塞本数と水位上昇量の最大値には比例的な関係が見られ、閉塞現象を制御するなどすれば、定量的な関係も見いだせる可能性もある。

そこで、流木姿勢を人為的に整えることで理想的な閉塞状態を作り、その結果生じる水位上昇過程を調べる。すなわち、ピア直上流の水面に流木を 1 本ずつゲートと平行に置いて、流木同士がクロスに絡み合わない閉塞状態をつくり、閉塞本数と水位上昇量 Δh_1 の関係を調べる。また、これらに与える流動条件や流木条件の影響を調べる。結果の一例を図-6 に示す。ここに水

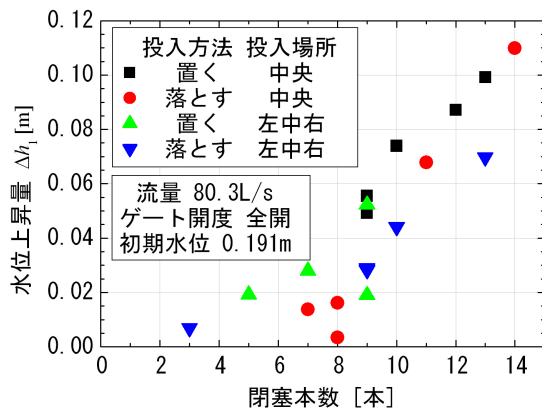


図-5 上流からの流木投入時の閉塞本数と水位上昇量の関係
[流木長 1.00m, 流木直径 0.02m]

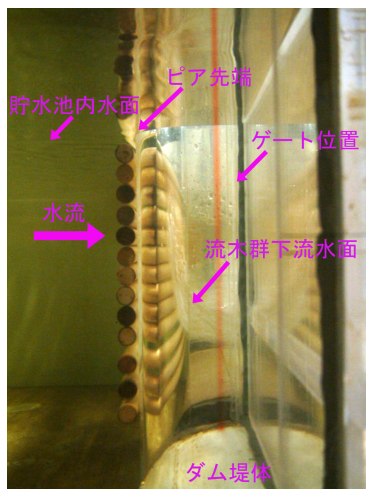


写真-1 多数の流木による閉塞状態 [Q=80.3L/s, L=0.70m, d=0.02m]

位上昇量 Δh_1 は、ゲート開度全開のフリーフローにおいて流木を供給しない場合の初期水位との差である。

はじめにフリーフローにおける流木挙動について述べる。本模型も含めて通常、ゲートよりも上流にピア先端があるので、ゲート幅より長い流木はピア先端で捕捉される。続けて投入する流木は、閉塞状態となった流木の上に位置するが、積み重なるのではなく、流木同士の隙間を保持したまま鉛直方向に閉塞状態となる。また、その際、隙間を保持した流木群が一体となって鉛直方向に振動したり、個々の流木が回転することもある。閉塞本数が増えると、流木群はゲートのようになり、流木群の下を多量の水が流れ、流木群の間を僅かな水が流出するようになって水位は上昇する(写真-1)。

次いで、閉塞本数と水位上昇量の関係について述べる。図-6によると、フリーフローの場合、はじめの1,2本では僅かに水位が下がることもあるが、その後は閉塞本数が増えるに従って水位上昇量は増加する。そして閉塞本数が一定量に達すると流木は流れに引き込まれず、それ以上の流木を投入しても上流側に貯まり続け、閉塞状態に寄与しないようになる。流木が同じである場合、閉塞本数と水位上昇の関係は流量にほとんど依存しないが、閉塞本数と水位上昇量の上限値(以下、

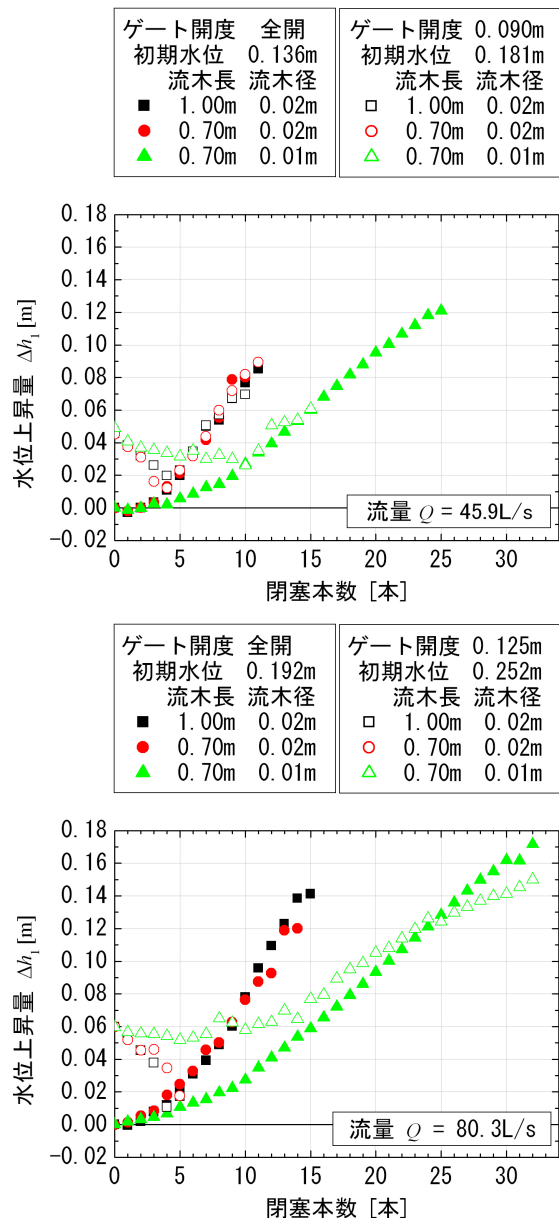


図-6 理想的な閉塞状態における閉塞本数と水位上昇量の関係

水位上昇上限値)は流量が多いほど多くなる。

流木条件の影響については、流量が同じ場合、長さが閉塞本数と水位上昇量に与える影響はないものの、直径については影響を与える。つまり、直径が細いほど閉塞本数は多く、水位上昇上限値も大きい。また、同じ閉塞面積の場合(例えば、直径0.01mが20本、直径0.02mが10本)、直径が細い方が水位上昇量は大きい。

一方、ゲート開度を調整し、水位開度比 h_1/a を2.0としたパーシャルフローにおいては、はじめに投入した流木は水面直下にあるが、続けて流木を投入すると1本目の流木は水中に没し、2本目以降が水面直下に位置する。また、フリーフローと同様に流木間には隙間があり、水面直下の流木を越流する流れ、流木同士の隙間を通過する流れ、最下端の流木の下を通過する流れが生じる。特に、水面直下の流木を越流する流れは、流木群とゲートの間にあった水面水位が下がるために直下流

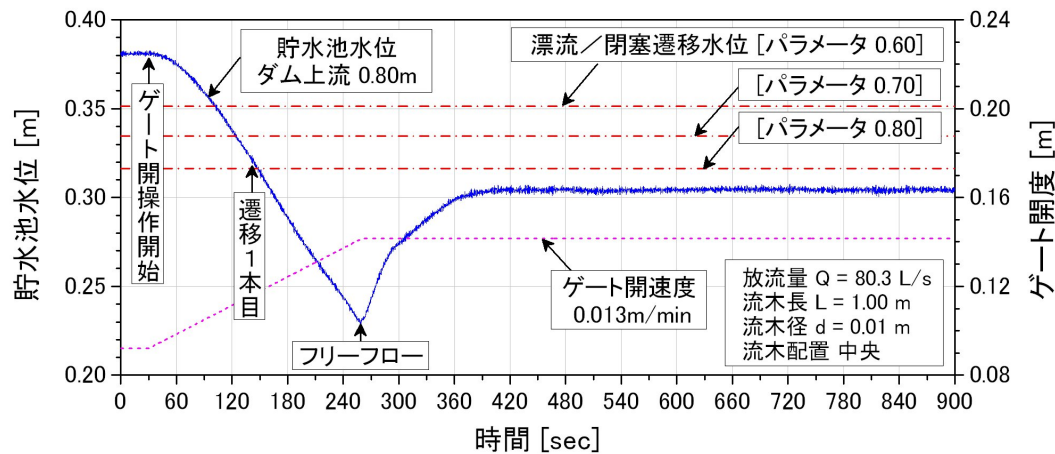


図-8 閉塞状態を伴う貯水池水位変化の一例

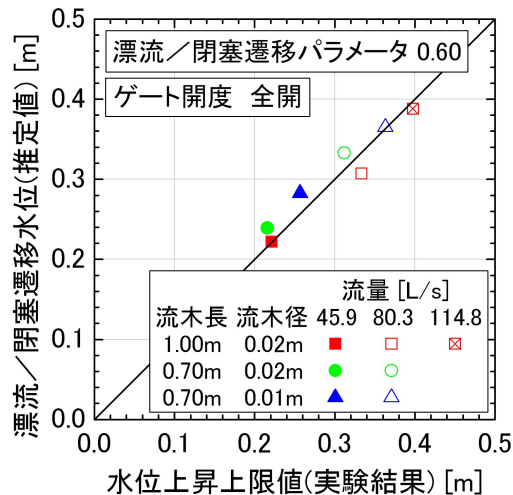


図-7 理想的な閉塞状態における水位上昇上限値(実験結果)と漂流/閉塞遷移水位(推定値)の比較

で滝落とし状態となる。よって、閉塞本数が更に増加すると流木群でパーシャルフロー状態になり、水がゲートに着水しないようになる。その結果、フリーフローにおける閉塞現象と変わらなくなる。また、閉塞本数と水位上昇量の関係については、投入初期の閉塞本数が少ない場合には水位が低下する。これは、ピア前面で閉塞状態となった流木がゲートの役目を果たし、最下端の流木がゲート下端標高よりも上にあるため、ゲート開度が見かけ上大きくなるためと考えられる。

これらの実験より、閉塞本数が増えて水位が上昇すると水面近傍の流速は低減し、水面に漂う流木は水面下に引き込まれなくなることが分かった。よって、水位上昇上限値は、水面近傍流速をパラメータとしてもつ漂流/閉塞遷移水位に一致することも考えられる。そこで、図-6の結果を含む理想的な閉塞状況で得られた水位上昇上限値と、漂流/閉塞遷移パラメータから算定される漂流/閉塞遷移水位の比較を行う。その結果を図-7に示す。ここに、漂流/閉塞遷移水位の推定値は、漂流/閉塞遷移パラメータに流木長さ L などを代入して得られた流速 V をゲート直上流水面近傍流速とした上で、図-3とゲート放流量算定式($Q = C_p a B \sqrt{2gh_1}$)を繰り返し計算することによってゲート開度 a とともに

求められる。なお、本検討においてゲート放流量算定式の流量係数 C_p は実験結果を用いた。

これらより、水位上昇上限値は漂流/閉塞遷移水位にほぼ一致し、漂流/閉塞遷移水位は閉塞状態における水位上昇上限値の推定にも用い得ることが分かった。

5. ゲート開操作時の閉塞状態と水位変化

ダム貯水池に流入する流木は、不規則な姿勢で漂流しながら洪水吐に達することが多く、図-5に示したように閉塞状態における水位上昇量は一意に決まらない。このため、ダムゲート操作に伴う流木挙動や水位変化を総体的に評価することは難しいと考えられる。そこで、ダム上流から時々刻々流入する流木ではなく、ダム前面を含めた貯水池一面に既に整列して漂流している多量の流木群を対象に、ゲート開操作に伴う流木挙動と水位変化を調べる。これによって、実運用における水位上昇上限値などを把握できると考えられる。

図-8は、流量 80.3L/s、ゲート開度 0.092m、貯水池水位 0.381m のパーシャルフロー状態の水面に、流木長 1.000m、流木直径 0.010m の流木模型をゲートと平行に上流に向かって 300 本並べた状態を初期状態として、ゲートを 0.013m/min の速度で開操作した場合の水位変化である。ここに、流木配置の「中央」とは、流木端を揃えて水路中央に配置したものである。なお、後述する流木配置の「交互」とは、流木端を揃えずに、流木中心と流木端が一行に並ぶように配置したものである。

観察結果によると、貯水池水位が漂流/閉塞遷移水位程度になると水面に漂う流木がピア前面の水面直下に次々と没し、流木群となる。さらに水位が低下すると、流木は水中でピア先端に張り付くようになるが、この時点では水位上昇に至らず、流木を供給しない通常のゲート開操作に伴う水位変化と比較しても、同じゲート開度における水位と差はほとんどない。ゲートを更に開放すると、貯水池水位よりもゲートと流木群の間の水位の方が低くなり、ゲート近傍ではフリーフローに遷移する。そしてその時刻前後で流れは加速するた

め、流木の閉塞本数は一気に増え、一部は流出し、水位上昇とともに閉塞本数も増加するために更に水位が上昇する。しかし、水位の急上昇に伴い水面付近の流速は急減速するため、閉塞本数と水位は一定値に落ち着いていく。図-8の実験では、総数 300 本の流木のうち、27 本がピア先端に張り付き、閉塞状態をもたらした。

次に、ゲート開操作時に観察された漂流状態から閉塞状態へ遷移し始める水位について検討を行う。図-9 は、様々な流動・流木条件における実験結果と漂流／閉塞遷移パラメータから算定される漂流／閉塞遷移水位の比較を行ったものである。なお、実験は同一の流動・流木条件で 3 回以上試行し、各々の結果を示しているが、流動・流木条件が同じであれば漂流／閉塞遷移水位の推定値は同じ値となる。図-9 によると、ほとんどのケースで実験結果は漂流／閉塞遷移水位の推定値よりも低く、ゲート開操作時の閉塞上限水位、すなわち、流木が閉塞状態となり得る上限水位はこの評価方法で概ね推定できると考えられる。

同様に、図-10 は、フリーフロー後に水位が上昇し、定常状態となった収束水位と漂流／閉塞遷移パラメータから算定される漂流／閉塞遷移水位を比較したものである。なお、流木長さがゲート幅よりも若干短い 0.5m のケースでは、全ての流木が下流へ流出した。これらより、閉塞状態となった流木群の形状によって若干の例外的な実験結果もあるが、閉塞状態時の収束水位は漂流／閉塞遷移水位よりも低くなるのが分かる。特に、現実により近い流木配置である「交互」の場合には、全てのケースで漂流／閉塞遷移水位以下であることが分かる。よって、ゲート 1 門のダム洪水吐において流木が閉塞状態となった場合の水位上昇上限値はこの評価方法で概ね推定できると考えられる。

6. 結言

本研究では、ゲート 1 門を有するダム洪水吐を対象に流木水理模型実験を行い、流木の漂流／閉塞遷移水位を明らかにするとともに、漂流／閉塞遷移パラメータとゲート直上流水面近傍流速、ゲート放流量算定式で構成される漂流／閉塞遷移水位の評価手法を提案した。また、流木の姿勢、配置を制御した理想的な閉塞状態を有する定常流れ、ゲート開操作時の非定常流れの両者を対象に流木集積時の水位上昇上限値を把握するとともに、この上限値の推定に漂流／閉塞遷移水位を適用できることを明らかにした。今後は、複数のゲートを有するダム洪水吐を対象として検討を行い、本評価方法の実用化を図る予定である。

謝辞：実験にあたり伊澤朋一氏（株）セレスの協力を頂いた。ここに記し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小松利光, 押川英夫, 塚原健一: 2005 年台風 14 号下での土砂・流木による耳川の河道閉塞とその対策, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.399-404, 2007

流 量		45.9 L/s		80.3 L/s		114.8L/s	
流 木 配 置		中央	交互	中央	交互	中央	交互
流木長	流木径						
0.70m	0.010m	■	■	■	■		
0.70m	0.020m	▲	▲	▲	▲		
1.00m	0.010m	◆	◆	◆	◆		
1.00m	0.018m	▼	▼	▼	▼	▼	
1.00m	0.020m	●	●	●	●	●	●

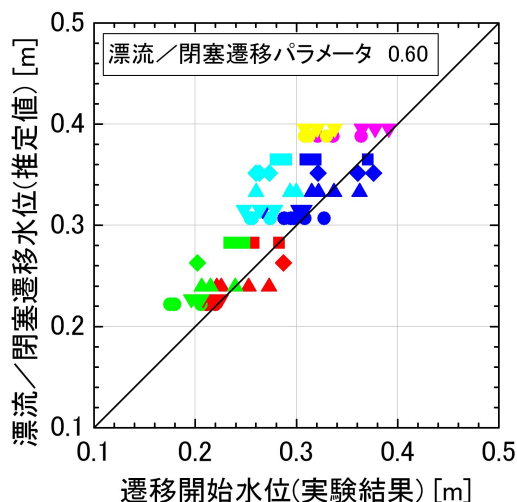


図-9 ゲート開操作時の漂流／閉塞遷移水位 (実験結果と推定値の比較)

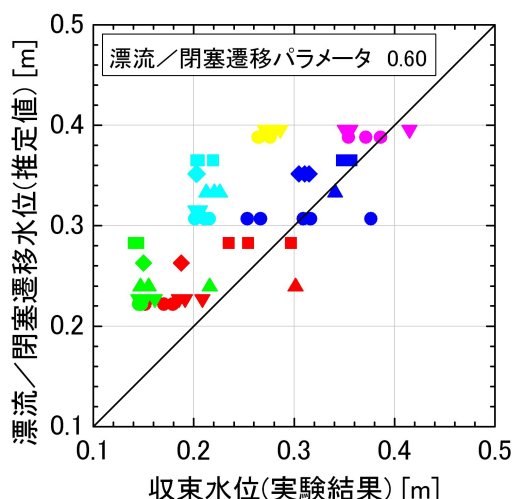


図-10 ゲート開操作時の閉塞後水位 (実験結果) と漂流／閉塞遷移水位 (推定値) の比較

- 2) 福岡捷二, 新井田浩: 流木類の流下・堆積とそれらの河道設計への利用, 土木学会論文集, 第 479 号, pp.51-60, 1993
- 3) 松本健作, 小葉竹重機, 清水義彦, 石田和之, 近内壽光, I.Ioakim: 流木塊の橋脚への堆積に関する研究, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.925-930, 2001
- 4) 坂野章: 橋梁への流木集積と水位せき上げに関する水理的考察, 国土技術政策総合研究所資料, 第 78 号, 2003
- 5) 水山高久, 石川芳治, 福澤誠: 流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究, 土木研究所報告, 第 183 号-3, 1991
- 6) 櫻井寿之, 柏井条介: 治水専用ダム放流設備入口部の流木対策, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1261-1266, 2006
- 7) 佐藤隆宏, 加藤誠司, 田中伸和, 米山望: ダム洪水吐クレストゲートの非定常放流特性に関する研究, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.793-798, 2008

(2009.9.30 受付)